

文章编号:1671-6833(2010)06-0031-04

饱和黏土非达西渗透特性试验研究

孙丽云¹,乐金朝¹,张杰²

(1. 郑州大学 水利与环境学院,河南 郑州 450001; 2. 郑州大学 土木工程学院,河南 郑州 450001)

摘要:利用改造过的渗透固结仪,通过交叉,进行固结试验和渗透试验,对河南某地饱和黏土在不同固结压力下的渗透规律进行了研究.试验证明,该种饱和黏土中的渗流存在偏离 Darcy 定律的现象,并可用 Hansbo 的非线性分段模型来描述.试验结果表明,黏土渗透性与孔隙比呈非线性关系,黏土渗透性随固结压力增加呈现非线性减小.在此基础上分析了相关渗透参数与孔隙比之间的关系.

关键词:非达西渗流;渗透性;饱和黏土;非线性

中图分类号:TU431 **文献标识码:**A

0 引言

目前,在饱和黏土的固结理论和渗流计算中,一般都沿用达西(Darcy)渗透定律,即

$$v = ki \quad (1)$$

式中: v 为渗透速度; k 为渗透系数; i 为水力梯度.虽然达西定律因其简捷而被广泛采用,但其对渗透性较低的致密黏土以及某些软土的有效性却一直受到质疑.许多学者通过试验都发现了黏土渗透规律对达西定律的偏离^[1-5].通过渗透试验都发现了相关黏土中的非达西渗透现象,并分别依据各自的试验总结出了非达西渗流的表达式.其中,应用较广的是 S. Hansbo^[1]公式:

$$v = \begin{cases} ci^m & (i \leq i_1) \\ k(i - i_0) & (i > i_1) \end{cases} \quad (2)$$

式中: m 为由实验确定的常数; c, k 分别为指数形式和线性关系表达式中的渗透系数; i_1 为直线渗流起始水力梯度; i_0 为直线渗流计算起始水力梯度,且 i_0, k 满足下式

$$\begin{cases} i_0 = i_1 = \frac{m-1}{m} \\ c = \frac{k}{mi_1^{m-1}} \end{cases} \quad (3)$$

式(3)中,如令 $m = 1$,则 $i_0 = 0, c = k$,该式可退化为 Darcy 定律的表达形式.

既然饱和黏土的渗透固结过程是孔隙水不断排出的过程,那么渗流规律将会影响到渗透固结的进程.文献[6]探讨了起始水力梯度对饱和黏土一维固结的影响,认为黏土的平均固结速率要慢于 Terzaghi 一维固结理论值.文献[7-8]将 Hansbo 渗流模型引入到饱和黏土的固结分析之中,研究表明,此类非线性渗流延缓了饱和黏土中孔隙水压的消散速度.因此讨论饱和黏土中渗流的形式及其参数的变化规律对于深入探讨饱和黏土的渗透固结机理十分重要.

在渗透试验方面,齐添等^[4-5]利用 GDS 高级固结仪对萧山黏土试样进行了固结渗透联合试验,并分析了非达西渗流模型的土性参数.由于传统的渗透试验不能得到固结过程中渗透系数的变化规律,无法研究固结过程中非达西渗流形式及其参数与固结压力随孔隙比变化的情况,笔者对传统的固结渗透试验装置进行了改进,设计了新型的固结渗透试验,对不同固结压力下饱和黏土的渗透特性进行了研究.

1 渗透固结仪的改装

图1为改装后的渗透固结试验装置.新试验装置主要由加荷系统、渗透固结容器、测流系统等3部分组成.其中加荷系统选用常规杠杆式固结仪;渗透固结容器主要由固结筒、紧固螺杆、加压

收稿日期:2010-04-10;修订日期:2010-06-16

基金项目:河南省教育厅自然科学研究计划项目(2010B560015);河南高速公路发展有限责任公司科技项目(2007GF009)

作者简介:孙丽云(1969-),女,河南濮阳人,郑州大学副教授,博士研究生,主要从事岩土工程等方面的教学与研究
工作, E-mail:liyunjia@zzu.edu.cn.

活塞、固结仪底座组成. 渗透系统采用内径 4 mm 的厚壁玻璃管作为测流管, 可灵敏反映液体体积变化.

在固结筒内放置直径为 61.8 mm, 高度为 20 mm 的试样(试样截面积为 30 cm²), 固结筒顶部连接一个测流管, 底部连接三通阀, 它既可以用孔压传感器来测定试样的底部孔压, 又可以连接另一个测流管, 从而确定两者的水头差.

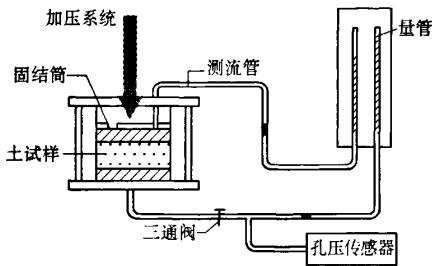


图1 变水头示意图

Fig.1 Sketch of varying head

2 黏土渗透性试验

对原状黏土使用改装后的固结仪进行变水头渗透和固结交叉试验. 该土样的初始物理性质如下: 含水率 $w = 3.57\%$, 密度 $\rho = 1.99 \text{ g/cm}^3$, 土粒比重 $d_s = 2.73$, 初始孔隙比 $e = 0.636$, 液限 $w_L = 41.5\%$, 塑限 $w_p = 24.0\%$.

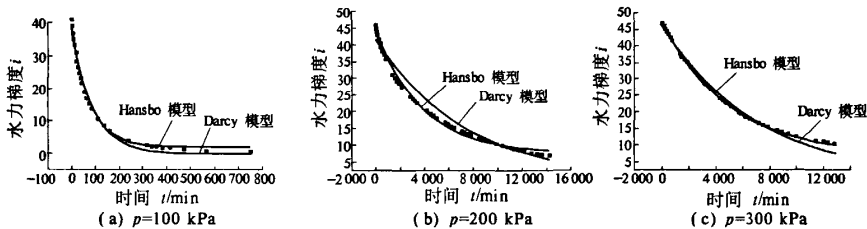


图2 $i-t$ 曲线的 Darcy 模型拟合与 Hansbo 模型拟合对比图

Fig.2 $i-t$ fitting curves obtained from Darcy model and Hansbo model

表1中给出了 Hansbo 模型中各参数在不同固结压力下的拟合结果, 其相关系数 R 均大于 0.98, 这说明该模型对于试验土样是适用的.

3.2 渗透参数与孔隙比的关系

3.2.1 k 的确定

图3为 k 随 p 变化的曲线图. 从图中可知, 黏土的渗透系数 k 随着固结压力 p 的增大而减少, 并呈现明显的非线性变化规律, 反映了土样渗透性的非线性特征. 当固结压力小于 200 kPa 时, k 递减很快, 此后逐渐放慢. 黏土的渗透系数 k 范围

2.1 准备试样

用涂有硅脂的环刀(环刀尺寸与土样一致)取土后, 参照规范方法[9], 切取土样后进行抽气饱和, 并确保土样饱和度达到 95% 以上.

打开与底座相连的三通阀使固结筒内注满无气水, 然后把装有土样的环刀放在固结仪内筒上方, 使土样下表面与内筒的水面接触. 同时打开底座“三通”阀门, 土样上方放置透水石, 将环刀中的试样轻轻压入固结筒, 压入土样时, 用力应缓慢、均匀, 以减少对土样的扰动.

2.2 试验过程

首先利用杠杆式固结仪进行固结试验, 固结试验结束之后, 保持固结压力不变, 进行变水头渗透试验. 然后继续加荷载, 重复上述步骤.

渗透试验中所用渗透水管高度为 1.2 m, 试样高度为 20 mm, 所以本次试验最大水力梯度为 30 ~ 50.

3 试验结果及分析

3.1 非达西定律的验证

图2中(a)、(b)、(c)分别为试验得到的 100, 200, 300 kPa 固结压力下 $i-t$ 曲线. 分别采用 Darcy 和 Hansbo 渗透模型进行拟合, 由此可以看出, Hansbo 渗透模型拟合结果要优于 Darcy 渗透模型, 说明黏土的非达西渗透性状是非常明显的.

为 $8.6 \times 10^{-9} \sim 1.1 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$.

表1 渗透试验数据的分段渗流模型非线性拟合结果
Tab.1 Nonlinear fitting results of seepage experimental data using two-section seepage model

p/kPa	$c/$ ($10^{-5} \cdot$ $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$)	m	R	$k/$ ($10^{-7} \cdot$ $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	i_0	R
50	0.57	1.42	0.995	1.10	0.44	0.999
100	0.54	1.49	0.999	0.84	1.97	0.996
200	0.12	1.54	0.999	0.33	7.76	0.999
400	0.06	1.70	0.996	0.20	10.04	0.999
800	0.03	1.82	0.993	0.09	14.29	0.983

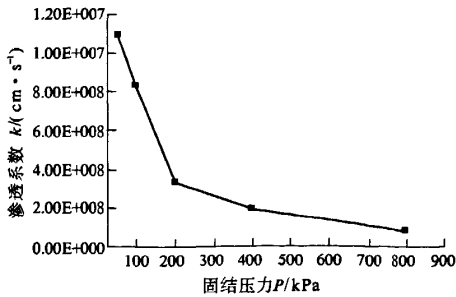


图 3 $k-p$ 曲线
Fig.3 $k-p$ curves

3.2.2 $e-k$ 关系

土体的渗透性与孔隙密切相关.土的颗粒孔隙愈小,渗透性愈小;反之,渗透性愈大.以孔隙比 e 为纵坐标,渗透系数 k 的对数为横坐标绘制 $e-lgk$ 曲线如图 4 所示,可以发现二者基本上呈直线关系:

$$e = 0.89 + 0.037lgk \quad (4)$$

即渗透指数 $C_k = 0.037$. 根据大量黏土的渗透试验统计发现, C_k 的范围在 0.02 ~ 5.00, 可见本次试验用黏性土的试验结果在此范围之内.

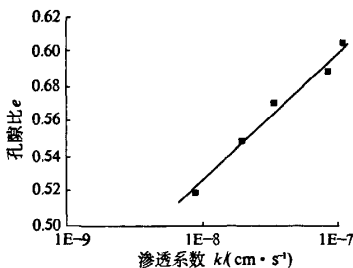


图 4 渗透指数 C_k
Fig.4 Permeability index

3.2.3 i_0-e 关系

试验表明,非达西渗流减缓了黏土层的固结过程.以孔隙比 e 为横坐标,起始水力梯度 i_0 为纵坐标绘制 i_0-e 曲线,如图 5 所示.从图 5 可以看出, i_0 随着孔隙比 e 的减小而增大,可近似为线性关系:

$$i_0 = 102.66 - 169.15e \quad (5)$$

3.2.4 $m-e$ 关系

以孔隙比 e 为横坐标,非达西渗流参数 m 为纵坐标绘制 $m-e$ 曲线,如图 6 所示.很明显, m 随着孔隙比 e 的减小而增大,可以用线性关系表示:

$$m = 4.35 - 4.84e \quad (6)$$

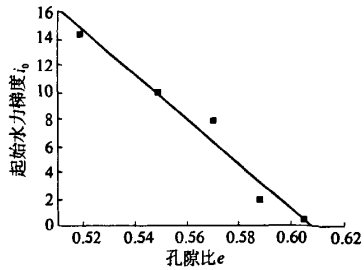


图 5 i_0-e 曲线
Fig.5 i_0-e curves

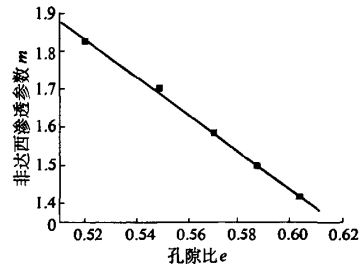


图 6 $m-e$ 曲线
Fig.6 $m-e$ curves

4 结论

笔者利用改装的固结仪,对河南某地黏土进行了固结渗透联合试验.试验结果表明,在各级固结压力作用下,土样中的渗流存在着偏离达西定律的现象,并且固结压力越大,非达西渗透特性越明显.数据拟合分析发现,其渗透规律可用 Hansbo 非线性分段渗流模型来描述,其中,渗透系数 k 和孔隙比 e 符合传统的半对数关系, i_0, m 和孔隙比 e 符合线性关系.

参考文献:

- [1] HANSBON S. Consolidation of clay with special reference to vertical sand drains [J]. Swedish Geotechnical Institute, 1960, 18:45 - 50.
- [2] LAW K T, LEE C F. Initial gradient in a dense glacial till [C]// Proceedings of the 10 th Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Rotterdam: A. A. Balkema, 1981:441 - 446.
- [3] 王秀艳,刘长礼. 对黏性土孔隙水渗流规律本质的新认识[J]. 地球学报,2003,24(1):91 - 95.
- [4] 齐添,谢康和,胡安峰,等. 萧山黏土非达西渗流性状的试验研究[J]. 浙江大学学报:工学版,2007, 41(6): 1023 - 1028.
- [5] 谢康和,齐添,胡安峰,等. 基于 GDS 的黏土非线性渗透特性的试验研究[J]. 岩土力学,2008,29(2):

- 420 - 424.
- [6] 刘忠玉,张天航,马崇武. 起始水力梯度对饱和黏土一维固结的影响[J]. 岩土力学,2007,28(3): 467 - 470.
- [7] 谢海澜,武强,赵增敏. 考虑非达西渗流的弱透水层的固结计算[J]. 岩土力学,2007,28(5): 1061 - 1065.
- [8] 鄂建,陈刚,孙爱荣. 考虑低速非 Darcy 渗流的饱和黏性土一维固结分析[J]. 岩土工程学报,2009,31(7):1115 - 1119.
- [9] 南京水利科学研究所. SL 237—1999 土工试验规程[S]. 北京:中国水利水电出版社,1999.

Experimental Study on Non - darcy Permeability Characteristics of Saturated Clays

SUN Li - yun¹, YUE Jin - chao¹, ZHANG Jie²

(1. School of Water Conservancy and Environment, Zhengzhou University, Zhengzhou, 450001, China; 2. School of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou, 450001, China)

Abstract: Based on the consolidation and permeability tests of saturated clays in Henan, the permeability of clays under different consolidation pressures are systematically investigated by using the modified osmotic oedometer. Experiments prove that the flow in this soil does not obey Darcy's flow and it can be described by the two - section model of Hansbo's. Experiment results show that permeability and void ration of clay are nonlinear relationship, and the permeability of Henan clays decreases nonlinearly with consolidation pressure increasing. Then the relations of the void ratio and the flow parameters are analyzed.

Key words: non - Darcy flow; permeability; saturated clays; non - linearity

(上接第 30 页)

[11] 田文秀,赵均海. 考虑抗弯钢筋影响的混凝土板冲

切承载力计算[J]. 强度与环境,2007,34(5):36 - 41.

Calculation of Ultimate Punching Shear Strength of Concrete Slabs

SHI Bao - quan¹, HAN Ju - hong², Wu Song - feng²

(1. Henan Expressway Development Co. Ltd., Zhengzhou 450015, China; 2. School of Water Conservancy and Environment, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: In this paper, the ultimate punching shear strength of concrete slabs supported on four sides is obtained by using the twin - shear stress three - parameter strength theory. Rigid - plastic model has been adopted and the punching failure of concrete slabs is simplified as a problem of plane strain based on the mechanism of punching shear and patterns of failure of the members. A theoretical formula for calculating the ultimate punching shear strength of such elements is established with theorem of plastic limit analysis. Therefor, a corresponding proposed simplified method is put forward taking account of the action of the longitudinal reinforcement. It is anastomotic compared with experiment.

Key words: concrete slab; punching shear strength; theorem of plastic limit analysis; twin - shear stress three - parameter strength criterion